
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

ОСОБЕННОСТИ ТЕКСТУРЫ И СТРУКТУРЫ ЯКУТИТОВ ИЗ РОССЫПЕЙ АНАБАРСКОГО АЛМАЗОНОСНОГО РАЙОНА

© 2022 г. Д. чл. С. С. Угапьева¹, *, А. Е. Молотков¹, С. А. Громилов², В. П. Афанасьев³,
д. чл. А. Д. Павлушин¹, А. П. Елисеев³, В. И. Попов⁴

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
Якутск, пр. Ленина, 39, 678980 Россия

²Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3, 630090 Россия

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, 630090 Россия

⁴Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Якутск, ул. Белинского, 58, 677000 Россия

*e-mail: sargylana-ugapeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.09.2021 г.

После доработки 27.10.2021 г.

Принята к публикации 09.12.2021 г.

Приводятся новые данные по изучению особенностей структуры поликристаллических агрегатов алмаза — якутитов из россыпей Анабарского алмазоносного района методами рентгеноструктурного анализа и оптической спектроскопии. Установлено, что все исследованные образцы являются тонкозернистыми (до 1 мкм) поликристаллами. На дифрактограммах большинства образцов присутствуют рефлексы, связанные с наличием лонсдейлитных дефектов в структуре алмаза. Показано, что якутиты неоднородны: дифрактограммы разных частей демонстрируют различную текстуру, а также наличие микрочерен с монокристаллическим строением. На несовершенство и значительные напряжения структуры якутитов указывает появление “колокола” в однофононной области ИК спектров. Отсутствие линии агрегированного азота в спектрах ФЛ якутитов позволяет предположить, что после этапа твердофазного синтеза, они были выброшены за пределы кратера и быстро охладились.

Ключевые слова: импактный алмаз, спектроскопия, поликристаллический агрегат, рентгеновские методы анализа, Сибирская платформа, якутиты

DOI: 10.31857/S0869605522010105

ВВЕДЕНИЕ

Якутиты представляют собой параморфозы алмаза по графиту, образовавшиеся в момент импактного события, сформировавшего Попигайскую кольцевую структуру, и выброшенные за ее пределы (Каминский и др., 1985; Афанасьев и др., 2019). Ареал распространения этой разновидности алмаза на северо-востоке Сибирской платформы весьма широкий, он простирается к востоку и к югу от Попигайской астроблемы, при этом самая дальняя их находка зафиксирована примерно в 600 км от кратера, в бассейне р. Келимьяр (Вишневецкий и др., 1997). Якутиты представляют собой непрозрачные или полупрозрачные зерна и обломки, как правило, бесформенные, иногда гексагональных очертаний, наследующие форму кристаллов графита (Галимов и др., 1980; Коптиль, 1994; Вишневецкий и др., 1997; Зинчук, Коптиль, 2003; Угапьева и др.,

2010; Афанасьев и др., 2019). По минералогической классификации Ю.Л. Орлова (Орлов, Каминский, 1981), они относятся к XI разновидности алмазов. Якутиты сходны с внутрикратерными импактными алмазами (ВИА) из тагамитов Попигайского кратера, тесно ассоциирующими с лонсдейлитом, имеют импактную природу и образовались мартенситным путем из графита пород мишени – архейских гнейсов. Основное отличие фазового состава якутитов заключается в отсутствии графита, по крайней мере, в заметных количествах (Афанасьев и др., 2019). Нами составлена сравнительная характеристика якутитов и алмазов из импактитов Попигайской астроблемы (табл. 1). Морфология и цвет сравниваемых разновидностей алмаза почти одинаковые, однако, в якутитах в отдельную группу выделены параллельно-шестоватые зерна, представляющие собой срастания микроскопических субиндивидов, ориентированных в одном направлении (Угапьева и др., 2010). Сравнимые разновидности алмаза различаются по массе и размеру зерен, что может быть связано с методом обогащения проб. По наличию директивной текстуры, присутствию лонсдейлита, цвету фотолюминесценции в УФ лучах, спектральным особенностям ФЛ и плотности якутиты и алмазы из импактитов Попигайской астроблемы не различаются. Хотя якутиты имеют более тяжелый изотопный состав углерода, обе разновидности попадают в группу В (импактные) в интервале изотопного состава важнейших генетических типов алмазов по Э.М. Галимову (1984), занимая по этому признаку промежуточное положение между подавляющим количеством монокристаллов алмаза и карбонадо бразильского типа (Зинчук, Коптиль, 2003).

Сходство якутитов с алмазами из импактитов Попигайской астроблемы по большинству характеристик свидетельствует о том, что они образовались в процессе кратковременного динамического сжатия при высоких температурах и давлениях.

Целью настоящей работы является изучение структурно-текстурных особенностей якутитов методами рентгеноструктурного анализа и оптической спектроскопии. Комплексное изучение данной разновидности алмазов поможет лучше оценить возможности их применения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Якутиты изучались на монокристалльном дифрактометре Bruker ApexDuo (CuK α -излучение, графитовый монохроматор, CCD-детектор). Детальные исследования морфологии поверхности агрегатов проводились на электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 350 “Oxford Instruments”. С помощью инфракрасного (ИК) комплекса, состоящего из ИК Фурье-спектрометра “ФТ-801” и ИК-микроскопа “Микран-2”, были исследованы слабо-прозрачные пластинчатые обломки. Съемка спектров ИК пропускания проводилась в диапазоне 700–4000 см⁻¹ со спектральным разрешением 1 см⁻¹. Ввиду малой прозрачности обломков, пропускание в ИК диапазоне было сильно ослаблено, а спектры зашумлены. Спектры комбинационного рассеяния (КР) регистрировались на измерительном комплексе ИНТЕГРА СПЕКТРА. При этом использовался объектив с увеличением 100 \times , численной апертурой NA = 0.7. КР спектры регистрировались низкошумящей CCD камерой с охлаждением до –70 °С. Для проведения измерений выбирался режим со временем накопления сигнала в каждой точке 50 с, длиной волны возбуждающего излучения твердотельного лазера 532 нм и гелий-неонового газового лазера – 632.8 нм, мощностью в пучке диаметром <1 мкм ~35 мВт и ~3 мВт соответственно. С помощью спектрометра Shimadzu PC 2501 были получены спектры оптического пропускания/поглощения в УФ-видимом-ближнем ИК, в диапазоне 200–1000 нм. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) в диапазоне 350–800 нм были получены при 80 К на дифракционном люминесцентном спектрометре LOMO SDL1 при возбуждении от третьей гармоники импульсного лазера на Nd:YLF (350.7 нм). Образцы

Таблица 1. Сравнительная характеристика якутита и импактных алмазов Попигайской астроблемы
Table 1. Comparative characteristics of yakutites and impact diamonds from the Popigai crater

Характеристика	Якутиты из россыпей р. Эбелях	Алмазы из импактитов Попигайской астроблемы
Форма	Окатанные бесформенные ¹ уплощенная, иногда с гексагональными очертаниями ² таблитчато-гексагональные ⁴ массивно-зернистые, таблитчатые, параллельно-шестоватые, спутанно-волокнистые ⁵	Уплощенные остроугольные ¹ уплощенная чешуйчатая, иногда с гексагональными очертаниями ² уплощенные и объемно-ксеноморфные ³ удлиненные гексагональные пластинки и таблички ⁶
Цвет	От темно-бурого до светло-бурого, желтый различных оттенков ⁴ коричневый с оттенками красного, реже темно-серый до черного ⁵	Бесцветный, белый, желтый, темно-серый, черный ^{1-3, 6,8}
Масса, мг	2–440 ⁴ 20–120 ⁵	≤0,2 ¹ 0,01–0,06 ²
Размер зерен	1–6 мм ¹ 2–13 мм ⁵	0,1–0,5 мм (изредка, до 1–5 мм) ³ 0,1–2 мм ⁶ 0,1–1,5 мм ⁸
Размер кристаллитов	<1 мкм ¹ 0,01–1,0 мкм ⁴ <1 нм	0,1–1,0 мкм ³ 0,2–0,5 нм ⁶ 5–50 нм ⁷
Текстура	Директивная текстура (10–90°) ^{2, 4, 5, 7}	Директивная текстура (20–40°) ^{1-3, 6}
Содержание лонсдейлита	До 50% ² 5–60% ⁴	В бесцветных образцах не выявлен до 30% ³ до 50% ⁶
Интенсивность и цвет фотолюминесценции	Очень слабая, отсутствует ² отсутствует ⁵	Слабая или отсутствует, желто-оранжевый ³ за исключением черных желто-оранжевый ⁶
Спектральные особенности ФЛ	(600 нм, 693 нм, 718 нм) ²	(600 нм, 693 нм, 718 нм, 777 нм) ²
Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$, ‰)	–9,9...–15,9 ^{1, 4} –9,9...–20,1 ² –8,7...–16,8 ⁵ –8...–17 ⁷	–12,3...–17,6 ¹ –12,3...–18,9 ² –15...–20 ⁶
Плотность (г/см ³)	3,44–3,55±0,02 ²	до 3,51 ³

Примечание. ¹ Галимов и др., 1980; ² Коптиль, 1994; ³ Вишневецкий и др., 1997; ⁴ Зинчук, Коптиль, 2003; ⁵ Угайева и др., 2010; ⁶ Масайтис, 2013; ⁷ Силаев и др., 2014; ⁸ Ohfuji, 2015.

располагались на холодном пальце металлического азотного криостата с кварцевыми окнами, закреплялись на черной клейкой ленте при комнатной температуре и монтировались в тонкой индиевой пластинке в случае работы при пониженных температурах (для обеспечения хорошего теплового контакта между образцом и холодным пальцем криостата). Изображения картин ФЛ были получены при возбуждении 365 нм от ртутной лампы мощностью 100 Вт. Кривые термостимулированной люминесценции (ТСЛ) получены в процессе нагрева образца со скоростью около 20 град/мин после УФ возбуждения светом 365 нм в течении 10 мин при 80 К.

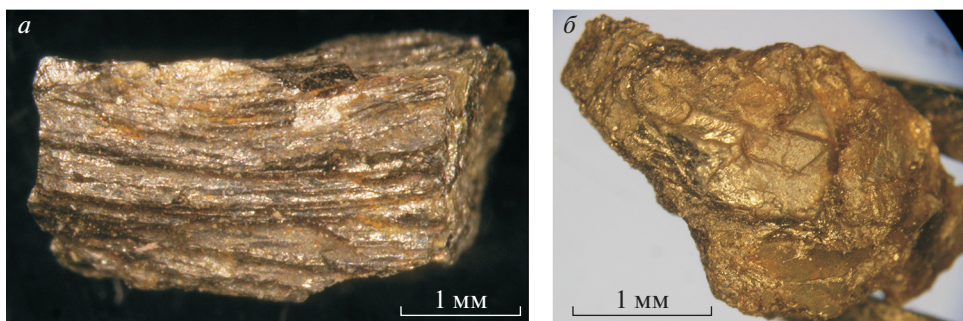


Рис. 1. Якутиты спутанно-волокнистого (*a*) и массивного (*б*) строения из россыпей Анабарского алмазоносного района.

Fig. 1. Tangled-fibrous (*a*) and massive (*b*) yakutites from placers of the Anabar diamondiferous region.

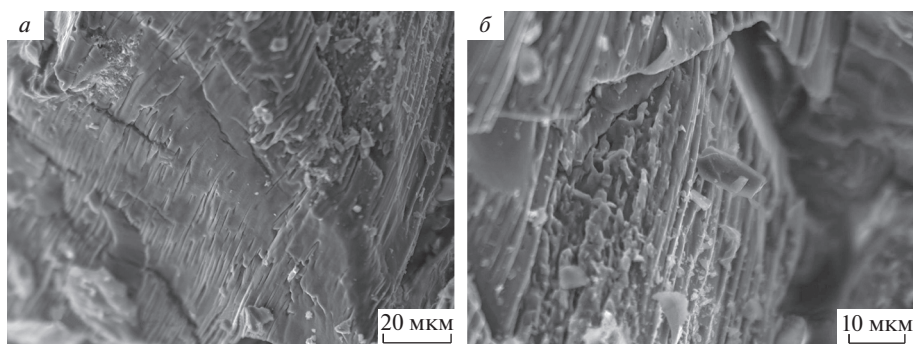


Рис. 2. Микроморфология поверхности якутитов: параллельно ориентированные листочки графита на поверхности образца Ya7 (*a*, *б*). Изображение в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 2. Micromorphology of the yakutites surface: parallel oriented graphite leaves on the surface of the sample Ya7 (*a*, *b*). BSE images.

МОРФОЛОГИЯ ОБРАЗЦОВ

Якутиты были отобраны из россыпей Анабарского алмазоносного района. Они представлены образцами спутанно-волокнистого и массивного строения размером 3–5 мм в поперечнике (рис. 1). Их морфологические особенности описывались ранее (Угапьева и др., 2010). Ряд образцов якутитов демонстрирует морфологические особенности, унаследованные от протофазы импактных алмазов (графита). На поверхности образца Ya7 хорошо прослеживается дискретное расположение торцов параллельно-ориентированных листочков графита отделенных друг от друга вдоль плоскостей весьма совершенной спайности по (0001) (рис. 2, *a*, *б*). Следы волнообразных деформаций еще гибких листочков графита указывают на то, что данная форма возникла до импактного события.

Алмазы данной разновидности окрашены в коричневый цвет с оттенками красного, реже темно-серый (до черного) цвет. На их поверхности часто присутствуют пленки силикатного стекла. По данным химического анализа в их составе доминируют Fe и Si (Афанасьев и др., 2019). Для исследования методами рентгеноструктурного анали-

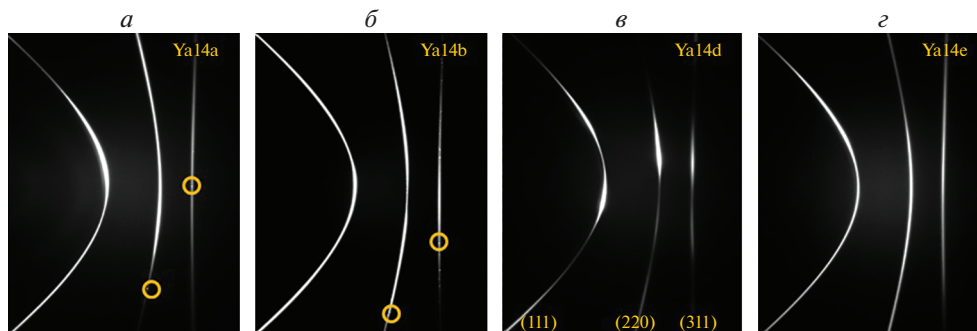


Рис. 3. Дифракционные картины (Bruker D8, $\text{CuK}\alpha$ -излучение, неподвижный образец) обломков якутита Ya14: *a*, *b* – включения монокристаллических зерен алмаза; *c* – текстура; *d* – поликристалл.

Fig. 3. Diffraction patterns of yakutite fragments Ya14 (Bruker D8, $\text{CuK}\alpha$, stationary sample): *a*, *b* – inclusions of monocrystal diamond grains; *c* – texture; *d* – polycrystal.

за и оптической спектроскопии образцы якутитов раскалывались с соблюдением мер предосторожности во избежание “заражения” образцов частицами металлической наковальни.

РЕНТГЕНОГРАФИЯ

Для рентгенографического изучения из расколотых образцов было отобрано по 5–10 зерен размером до 0.5 мм. Выбор такого размера обусловлен размером коллиматора первичного пучка (0.6 мм): отобранные зерна находились целиком внутри пучка при всех поворотах, что позволило избежать неконтролируемого уширения дифракционных линий, связанного с геометрическими условиями эксперимента.

На первом этапе была проведена съемка неподвижных образцов. Анализ полученных дифракционных картин показал, что хотя изученные якутиты в основном представляют собой поликристаллические алмазы, можно выделить и другие их разновидности. На рис. 3 показаны дифракционные картины для четырех обломков якутита Ya14. Обломки Ya14a и Ya14b представляют собой поликристаллы с включениями монокристаллических зерен алмаза, о чем свидетельствует появление на сплошных дифракционных дугах (на рисунке показаны их индексы hkl) отдельных ярких точечных рефлексов. Обломок Ya14d текстурирован: дифракционные дуги не однородны. Однородность и хорошая заполненность дуг на дифракционной картине обломка Ya14e указывают на то, что он является поликристаллом, образованным сильно разориентированными наноразмерными кристаллитами.

На втором этапе были получены дифрактограммы образцов по методике, описанной в работе А. Елисеева и соавторов (Yelisseyev et al., 2015). Методика заключается в получении и суммировании нескольких десятков дебаеграмм при различных ориентациях образца относительно первичного пучка. Введение поправок на внешний эталон (Si – SRM-640) и переход к стандартному виду (рис. 4) осуществляется с помощью программы Diotas. Полученные дифрактограммы даже для разных осколков одного образца якутита различаются по соотношению интенсивностей рефлексов алмаза $(111)_D$ и лонсдейлита $(100)_L$. В изученных образцах относительная интенсивность последнего не превышала 10%. Ни в одном из изученных образцов не был обнаружен графит. Отсутствие (или крайне малое содержание) графита в якутитах, вероятно связано с тем, что якутиты образовались в эпицентре взрыва при максимальных температуре и дав-

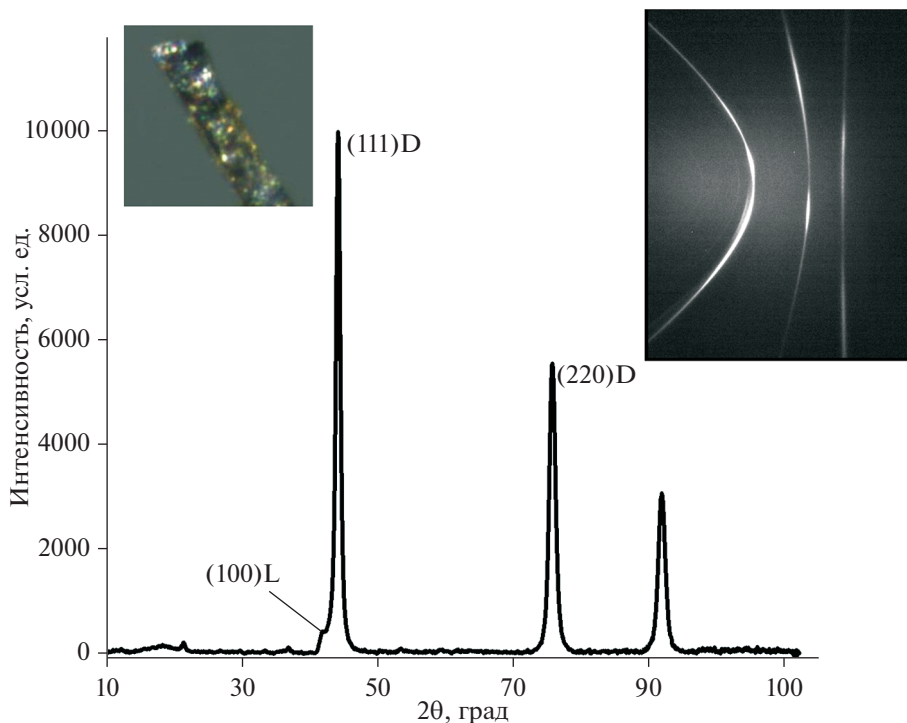


Рис. 4. Фото, дифрактограмма и дебаеграмма частицы расколотого образца якутита.

Fig. 4. Photo, diffractogram and debyeogram of the split yakutite fragment.

лении, в результате чего практически весь графит перешел в высокобарические фазы. В процессе выброса произошла закалка этого состояния.

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

ИК спектры полупрозрачных частиц якутитов в двуфононной области ($1332\text{--}2662\text{ см}^{-1}$) показали картину решеточного поглощения, типичную для монокристаллов алмаза (Бокий и др., 1986) (рис. 5). Область, включающая однофононную часть спектра ($600\text{--}1332\text{ см}^{-1}$), напротив, выглядит нехарактерно в сравнении со спектрами монокристаллов. Там, где для монокристаллов алмаза обычно расположены линии, маркирующие дефекты, соотносимые со структурной примесью азота, наблюдается широкая и сглаженная область ($\sim 800\text{--}1500\text{ см}^{-1}$). Вероятно, появление такого “колокола” связано с несовершенством структуры якутитов и значительными напряжениями. Перегибы спектрального контура в этой области ($969, 1102, 1225, 1330\text{ см}^{-1}$) ранее упоминались в работах А. Елисеева и др. (Yelisseyev et al., 2015, 2018). Происхождение этих линий пока не ясно. Также системно проявляется перегиб в районе $910\text{--}920\text{ см}^{-1}$. Можно отметить, что на некоторых спектрах в пределах “колокола” ($800\text{--}1500\text{ см}^{-1}$) наблюдается небольшое “седло” в области $1227\text{--}1242\text{ см}^{-1}$, характерное для природных алмазов типа IaAB. В трехфононной области спектра хорошо различимы линии 2852 и 2920 см^{-1} , свидетельствующие о возможном о присутствии групп CH_3 и CH_2 .

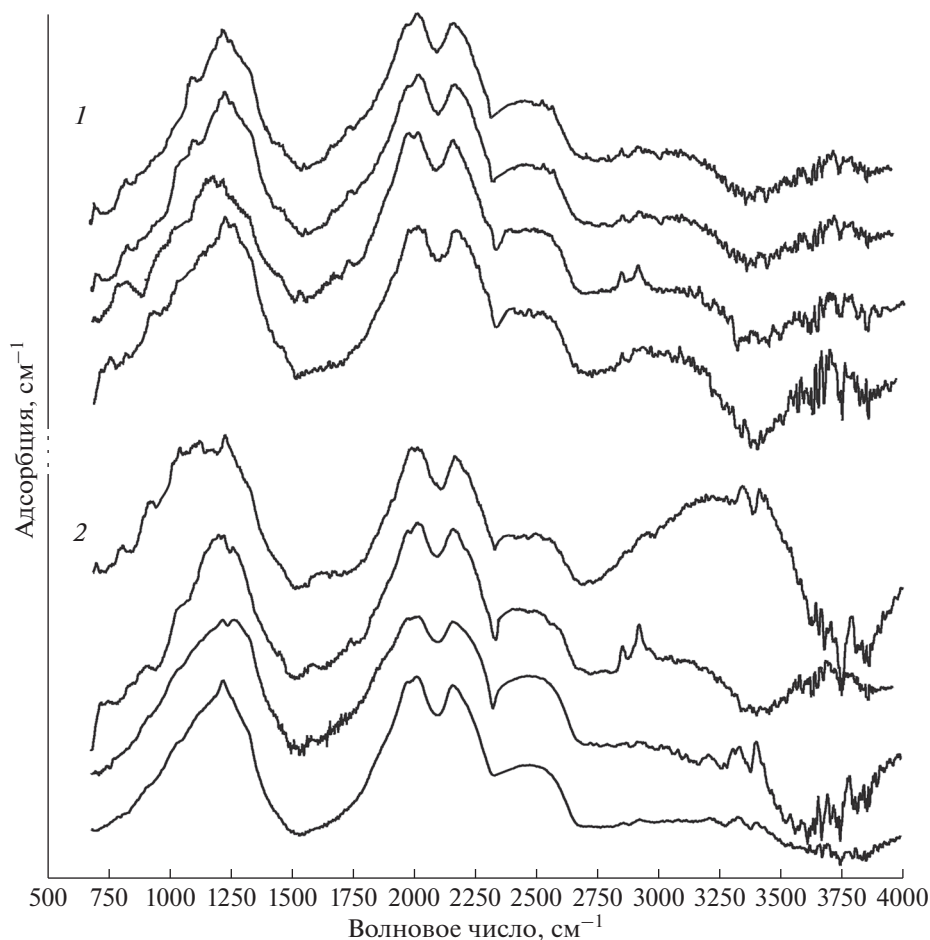


Рис. 5. ИК спектры частиц якутитов.

Fig. 5. IR spectra of yakutite fragments.

Слабоинтенсивные широкие линии около 1650 и 3400 см^{-1} указывают на наличие воды или гидроксильных групп (Бокий и др., 1986).

Следует отметить, что у разных осколков одного зерна якутита ИК спектры немного различаются. Но при слабой прозрачности образцов и сильной зашумленности спектров, утверждать, что это различие является следствием различий частей поликристаллического агрегата затруднительно.

КР спектры, полученные от полупрозрачных частиц якутита, аналогичны описанным ранее (Афанасьев и др., 2019) (рис. 9). По сравнению с КР спектром монокристалла кимберлитового алмаза, основная линия алмаза 1332 см^{-1} на спектрах якутитов сильно уширена, что указывает на сильные деформации в их структуре. Наблюдаемое плечо у основания характеристической линии алмаза в области $1320\text{--}1326\text{ см}^{-1}$ может быть отнесено к диагностической линии лондейлита; согласно С.И. Исаенко и Т.Г. Шумиловой (2011), нагрев алмаза смещает диагностическую линию алмаза 1332 см^{-1} в положение 1325 см^{-1} , при этом наибольшее смещение характерно для на-

нокристаллических алмазов, что возможно наблюдается и в нашем случае. Низкоэнергетическая полоса $335\text{--}340\text{ см}^{-1}$ в спектрах якутитов связана с дополнительными углеродными (?) фазами.

На рис. 6 приведены спектры пропускания для ВИА и якутитов в сравнении с кимберлитовыми алмазами типов Па и Ia, а также монокристалла CVD. Видно, что для всех этих разновидностей коротковолновый край пропускания расположен при разных длинах волн. Для совершенного по структуре кимберлитового алмаза и алмаза CVD (типа Па) край расположен около 225 нм, что соответствует ширине запрещенной зоны $E_g = 5.5\text{ эВ}$ (рис. 6, кривые 4 и 6). Для алмаза типа Ia край пропускания расположен около 280 нм (рис. 6, кривая 5) и этот сдвиг обусловлен азотными центрами А (Zaitsev, 2001). В спектрах пропускания для трех ВИА и трех полупрозрачных фрагментов якутитов край расположен в диапазоне 280–380 нм. Пропускание нарастает плавно и достигает максимальных значений в области около 1000 нм. Постепенное нарастание пропускания с увеличением длины волны связывается с рэлеевским светорассеянием на протяженных дефектах (границы зерен, дефекты на них и т.д.). Известно, что интенсивность рэлеевского рассеяния пропорциональна $1/\lambda^4$, где λ – длина волны. На спектрах отсутствуют какие-либо особенности. Как ВИА, так и якутиты являются полупрозрачными, пропускание не превышает 30%, что гораздо ниже, чем у прозрачных монокристаллов алмаза. Относительно низкая прозрачность ВИА и якутитов даже в длинноволновом диапазоне связывается с поглощением дефектов и включений графита. Красный сдвиг края поглощения в ВИА и якутитах объясняется также и поглощением лонсдейлита. Теоретические оценки дают значение ширины запрещенной зоны около 4.55 эВ для лонсдейлита, что соответствует длине волны 280 нм (Yeliseyev et al., 2013). Это значение E_g хорошо согласуется с опубликованными данными (Salehpour, Satpathy, 1990), но значительно превышает значение 3.5 эВ, приведенное в работе (Wen et al., 2008).

На спектрах ФЛ, полученных при возбуждении 350 нм и температуре 80 К, для восьми образцов ВИА (рис. 7, а) и пяти якутитов (рис. 7, б), доминирует широкополосная область в диапазоне 400–800 нм, в которой отмечаются четыре основные полосы с максимумами около 440, 550, 630 и 700 нм. В случае последних двух полос положение максимума, его ширина и относительная интенсивность существенно варьируют. Полоса ФЛ 550 нм обычно доминирует в образцах ВИА, тогда как полоса 700 нм наиболее интенсивна в якутитах. Полоса 440 нм наблюдается только в некоторых из ВИА (около 30%). Все детали, такие, например, как плечо около 415 нм хорошо воспроизводятся. Иногда это плечо полностью превращается в линию 415.2 нм. Данное свечение наиболее эффективно возбуждается в диапазоне 330–410 нм. Все отмеченные особенности позволяют интерпретировать эту полосу как электронно-колебательную систему N3 с бесфоновой линией (БФЛ) 415.2 нм, которая связана с азотно-вакансионным комплексом N_3V , состоящим из трех атомов азота вокруг вакансии (Zaitsev, 2001). Такое излучение ФЛ характерно для подавляющего большинства природных кимберлитовых алмазов. В кимберлитовых алмазах типичная ширина БФЛ составляет около 0.5 нм при 80 К. В ВИА эта БФЛ существенно уширена: значения FWHM составляют от 2 до 4 нм. Наличие центров N_3V в ВИА означает, что в этих алмазах присутствует азот в сильно агрегированном состоянии. В монокристаллах алмаза центры N_3V образуются в результате высокотемпературного отжига при температурах выше 1900 °С (Клюев и др., 1978). В якутитах система N3 в спектрах ФЛ не наблюдается. Предполагается, что ВИА испытали длительный высокотемпературный отжиг, когда они находились в тагамитах Попигаевского кратера: в процессе отжига примесный азот диффундировал и произошло его агрегирование с образованием N_3V центров. Якутиты – это импактные алмазы, которые были выброшены из кратера после этапа твердофазного синтеза и охладилась достаточно быстро.

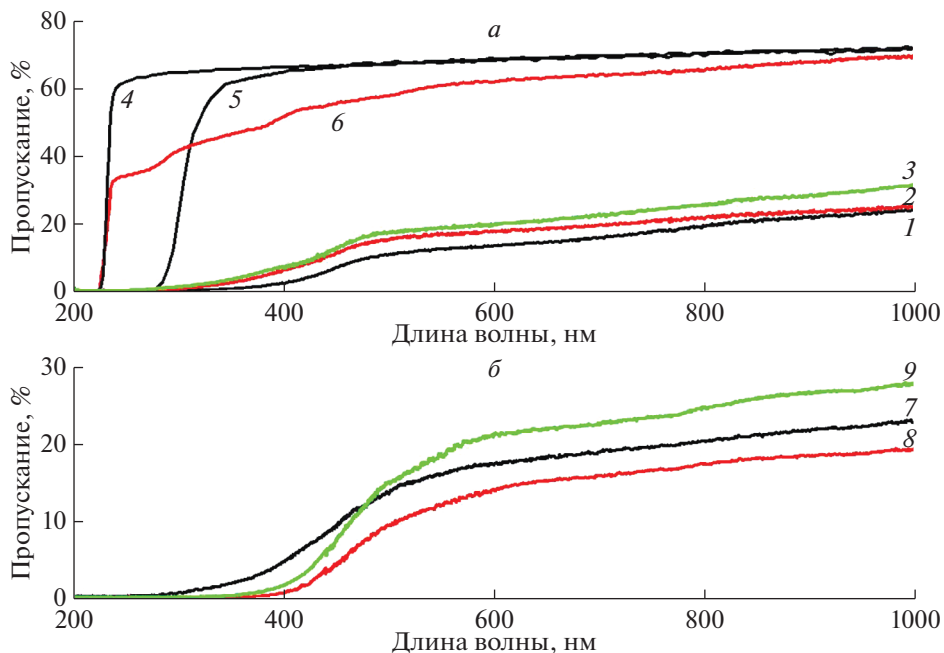


Рис. 6. Спектры пропускания в УФ-видимой-ближней ИК области для: трех образцов ВИА (кривые 1–3, *a*), трех фрагментов якутитов (кривые 7–9, *b*), кимберлитовых алмазов типов IIa (кривая 4) и Ia (кривая 5); монокристалла CVD (кривая 6).

Fig. 6. Transmission spectra in the UV-visible-near-IR region for: three VIA samples (curves 1–3, *a*), three fragments of yakutites (curves 7–9, *b*), kimberlite diamonds of types IIa (curve 4) and Ia (curve 5); CVD single crystal (curve 6).

В спектрах ФЛ как ВИА, так и якутитов, иногда наблюдаются дополнительные узкие полосы в диапазоне 600–800 нм (рис. 7, *a, б*). В спектрах ФЛ якутитов наиболее интенсивны полосы в спектрах ФЛ для ВИА и якутитов показаны пунктирными линиями на рис. 7. Следует отметить, что ни одна из указанных линий не проявляется в монокристаллических алмазах (Zaitsev, 2001). В спектрах ФЛ якутитов все линии сильно уширены (3–9 нм).

Форма кривых ТСЛ якутитов без лонсдейлита достаточно хорошо воспроизводится от образца к образцу, характерные пики расположены около 180, 240 и 400 К (рис. 8, *a*, кривые 1–2). При наличии лонсдейлита форма кривых ТСЛ становится более сложной (рис. 8, *a*, кривые 3–4). Такая же закономерность прослеживается для ВИА. Наиболее интенсивный пик для ВИА без лонсдейлита смещен в высокие температуры к 300 К (рис. 8, *б*, кривые 1–4). Для ВИА с лонсдейлитом наблюдается практически сплошное свечение ТСЛ со слабо проявляющимися пиками (рис. 8, *в*, кривые 1–6). Ситуация существенно отличается от случая монокристаллических алмазов, где кривая ТСЛ представляет собой набор узких хорошо отделенных друг от друга пиков, причем кривые ТСЛ для алмазов типа Ia, IIa, IIb и так называемого “промежуточного” типа принципиально различаются (Yelisseyev et al., 2020; Nahum, Halperin, 1961).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Новые данные о структуре якутитов, полученные методами рентгеноструктурного анализа и оптической спектроскопии, интересны как в генетическом, так и в при-

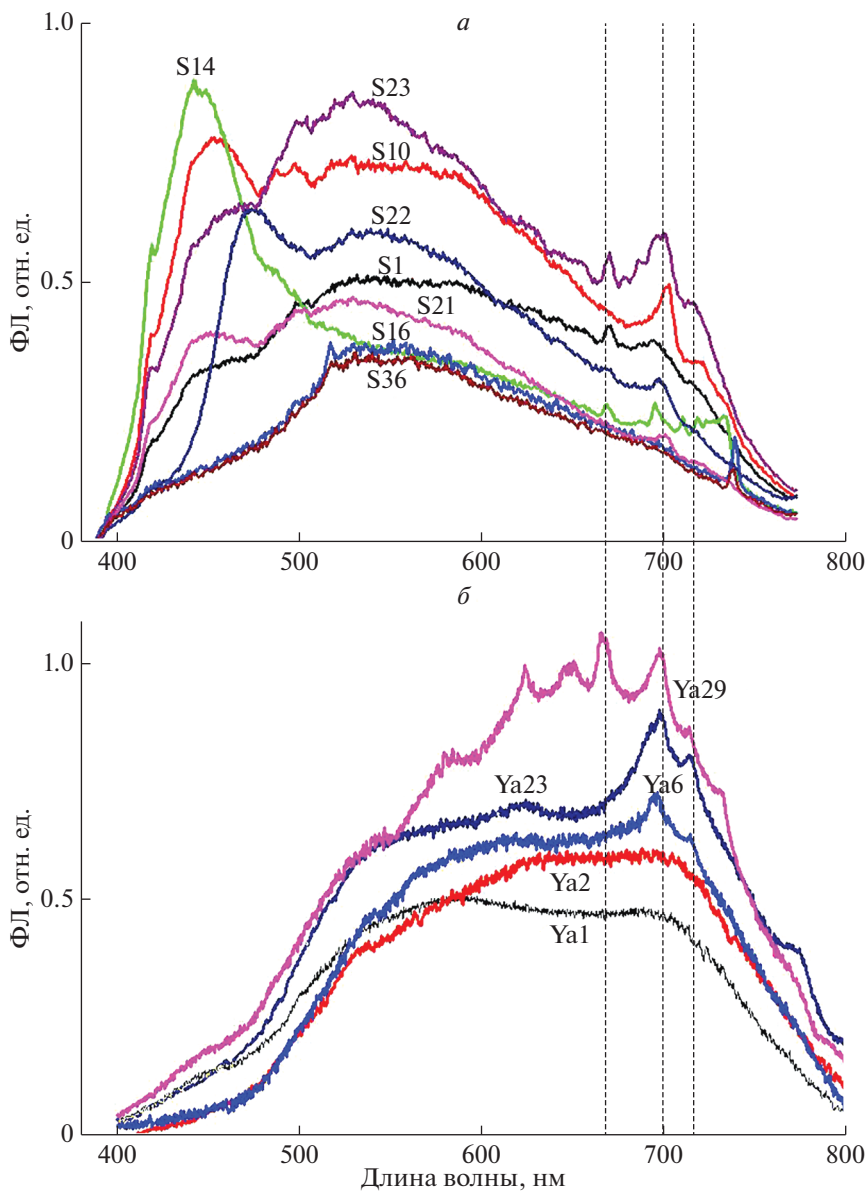


Рис. 7. ФЛ спектры для восьми образцов ВИА (а) и пяти образцов якутита (б).

Fig. 7. FL spectra for eight VIA (a) and five yakutite (b) samples.

кладном отношении. В настоящее время более детально изучена структура внутрикратерных импактных алмазов Попигайской астроблемы, тогда как якутитам, ареал распространения которых за пределы кратера огромен, уделялось мало внимания из-за сложности их диагностики (отделения) при обогащении. Полученные данные дополняют материалы более ранних исследований (Угапьева и др., 2010; Афанасьев и др., 2019; Afanasiev et al., 2019).

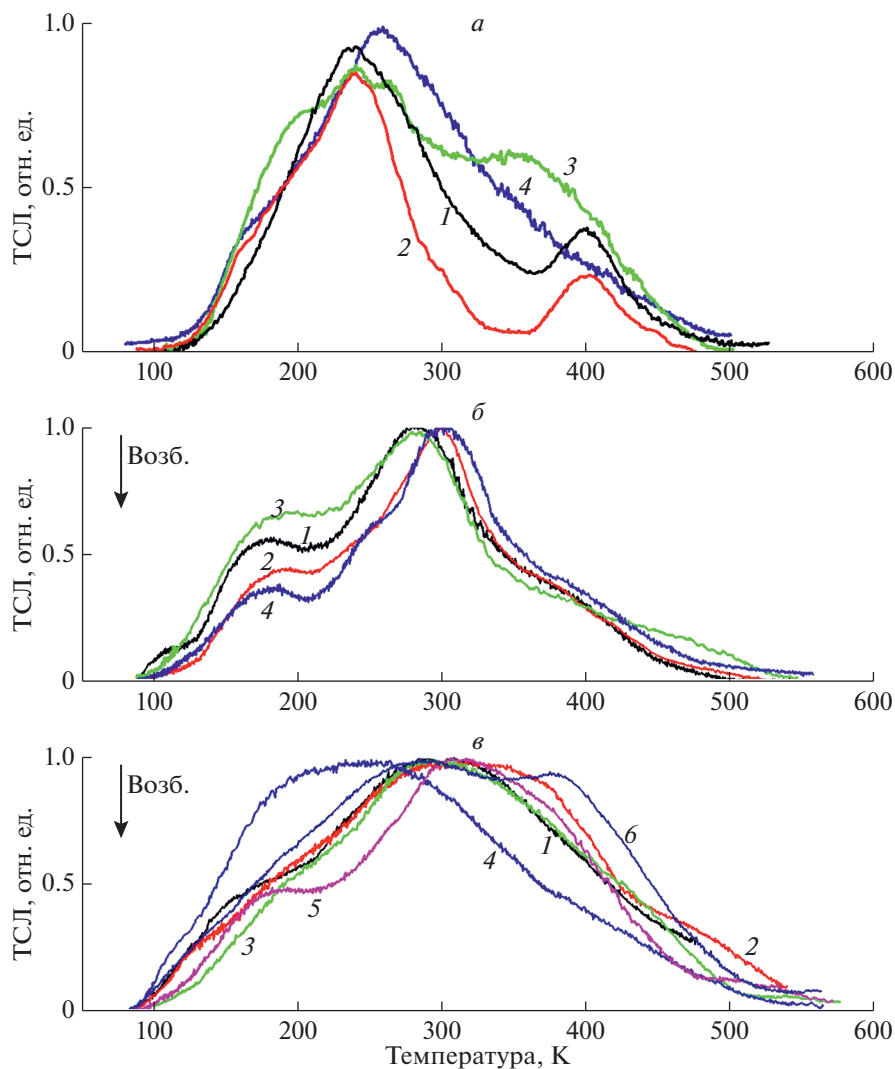


Рис. 8. Нормализованные кривые ТСЛ: *а* – якутитов без лонсдейлита (кривые 1–2) и с лонсдейлитом (кривые 3–4); *б* – ВИА без лонсдейлита; *в* – ВИА с лонсдейлитом.

Fig. 8. Normalized TSL curves: *a* – yakutites without lonsdaleite (curves 1–2) and with lonsdaleite (curves 3–4); *б* – VIA without lonsdaleite; *в* – VIA with lonsdaleite.

Результаты рентгенографического исследования показывают, что якутиты представляют собой поликристаллические агрегаты с размерами кристаллитов, варьирующими от долей микрон до 1 мкм и более. Ранее, при исследовании якутитов на рентгеновской установке УРС-0.3 в камерах РКД, РК ОП-А методами Дебая–Шеррера и Лауэ, основываясь на четких и ярких рефлексах алмаза на дебаевских дугах, мы указывали, что в одном образце кристаллиты алмаза могут иметь достаточно крупные размеры (Угапьева и др., 2010). При этом образцы имеют явно выраженную текстуру и высокую степень дефектности, о которой свидетельствуют полосы астеризма.

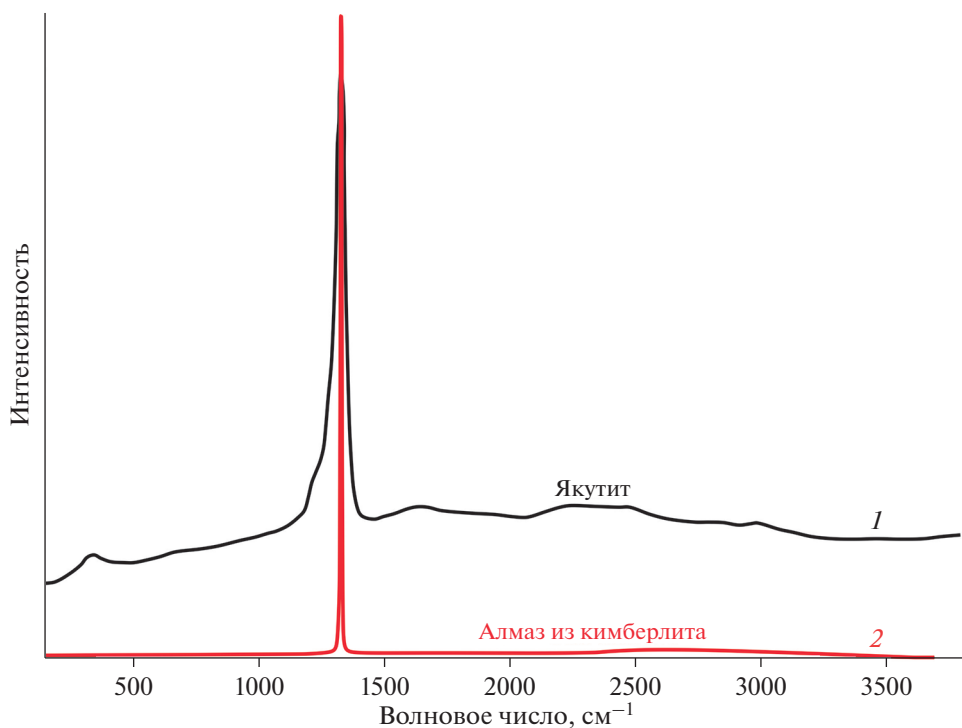


Рис. 9. КР спектры частицы расколотого образца якутита (1) и алмаза из тр. Айхал (2).

Fig. 9. Raman spectra of split yakutite fragment (1) and diamond from the kimberlite pipe Aikhal (2).

На дифрактограммах исследованных образцов, независимо от их прозрачности, лонсдейлитные дефекты проявляются в виде дополнительных заметно уширенных рефлексов. Исследования якутитов методами дифрактометрии и рамановской спектроскопии показали, что наличие лонсдейлитных дефектов меняет оптические свойства импактных алмазов, включая оптическое пропускание, фото- и термолюминесценцию. Это также затрудняет создание определенных типов примесно-вакансионных комплексов в алмазах Попигайской кольцевой структуры для различных применений (Yelissev et al., 2020).

На дифрактограммах якутитов не проявляются линии графита. Это, однако, не означает отсутствие в образцах атомов sp^2 -углерода. Крайне малое содержание или отсутствие графита в якутитах вероятно связано с их образованием в эпицентре взрыва при максимальных динамических параметрах, что привело к переходу практически всего графита в высокобарические фазы.

На ИК спектрах якутитов в однофонной области отсутствуют линии, маркирующие азотные дефекты, характерные для обычных монокристаллов алмаза, и проявляется широкий сглаженный участок (~ 800 – 1500 cm^{-1}) в виде “колокола”, что связано с несовершенством структуры поликристаллических алмазов и значительными напряжениями.

Анализ пропускания/поглощения в УФ-видимом и ближнем ИК диапазоне якутитов показывает, что исследованные образцы являются полупрозрачными, причем пропускание не превышает 30%. Низкая прозрачность якутитов связана с поглощени-

ем света дефектами и включениями графита, красный сдвиг края поглощения объясняется поглощением, обусловленным присутствием лонсдейлита.

Спектры ФЛ якутитов в сравнение с ВИА и кимберлитовыми алмазами отличаются отсутствием системы N3. Наличие линии агрегированного азота в спектрах ФЛ ВИА позволяет предположить более длительную отжиговую историю в отличие от якутитов, которые после этапа твердофазного синтеза были выброшены за пределы кратера и охладились достаточно быстро.

Таким образом якутиты представляют собой поликристаллы с неоднородным строением. Большая часть объема одного агрегата якутита состоит из сильно разориентированных наноразмерных кристаллитов; также в нем могут присутствовать и микрзерна с монокристаллическим строением.

Работа выполнена в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН и при частичной финансовой поддержке проектов РФФИ 18-45-140011 p_a, “Арктика” 18-05-70063.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.П., Угапова С.С., Елисеев А.П., Громилов С.А.* Якутиты – импактные алмазы Попигайской астроблемы // Руды и металлы. **2019**. № 2. С. 30–37.
- Бокий Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А., Налетов А.М., Непша В.И.* Природные и синтетические алмазы. М.: Наука, **1986**. 220 с.
- Вишневецкий С.А., Афанасьев В.П., Аргунов К.П., Пальчик Н.А.* Импактные алмазы: их особенности, происхождение и значение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, **1997**. 53 с.
- Галимов Э.М., Ивановская И.М., Клюев Ю.А. и др.* Изотопный состав и особенности кристаллической структуры природных поликристаллов алмаза с лонсдейлитом // Геохимия. **1980**. № 4. С. 533–539.
- Галимов Э.М.* Вариации изотопного состава алмазов и связь их с условиями алмазообразования // Геохимия. **1984**. № 8. С. 1091–1117.
- Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы М.: Недра, **2003**. 603 с.
- Исаенко С.И., Шумилова Т.Г.* Термостимулированное расщепление КР-активных мод лонсдейлита // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. **2011**. № 9. С. 29–33.
- Каминский Ф.В., Блинова Г.К., Галимов Э.М. и др.* Поликристаллические агрегаты алмаза с лонсдейлитом из россыпей Якутии // Минералогический журн. **1985**. Т. 7. № 1. С. 62–67.
- Коптиль В.И.* Типоморфизм алмазов северо-востока Сибирской платформы в связи с проблемой прогнозирования и поисков алмазных месторождений. Автореферат дис. ... канд. г.-м. н. Новосибирск, **1994**. 34 с.
- Клюев Ю.А., Непша В.И., Епишина Н.И. и др.* Особенности структуры природных поликристаллических алмазов // Доклады АН СССР. 1978. Т. 240. № 5. С. 1104–1107.
- Орлов Ю.Л., Каминский Ф.В.* “Карбонадо” с лонсдейлитом – новая (XI) разновидность поликристаллических агрегатов алмаза // Доклады АН СССР. **1981**. Т. 259. № 2. С. 459–461.
- Угапова С.С., Заякина Н.В., Павлушин А.Д., Олейников О.Б.* Результаты комплексного минералогического исследования якутитов из россыпей Анабарского алмазоносного района // Отечественная геология. **2010**. № 5. С. 37–45.

Texture and Structure Features of Yakutites from Placers of the Anabar Diamondiferous Region

S. S. Ugapeva^{a, *}, A. E. Molotkov^a, S. A. Gromilov^b,
V. P. Afanasiev^c, A. D. Pavlushin^a, A. P. Yelisseyev^c, and V. I. Popov^c

^aDiamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch RAS, Yakutsk, Russia

^bNikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia

^cSobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia

^dAmmosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

*e-mail: sargylana-ugapeva@yandex.ru

New data on the study of structure features of polycrystalline diamond (yakutites) from placers of the Anabar diamondiferous region by X-ray and optical spectroscopy are presented. It is established that all studied samples are fine-grained (up to 1 microns) polycrystals.

The diffractograms of most samples show reflexes associated with lonsdaleite defects presented in the diamond structure. It is shown that the yakutites are inhomogeneous: diffractograms of different parts of diamond aggregates show different reflections of texture and the presence of micrograins with a monocrystalline structure. The appearance of a “bell” in the single-phonon region of IR spectra indicates defects in the crystal structure of yakutites and a significant structural stress. The aggregated nitrogen line in the photoluminescence spectra of yakutites is absent. It suggests that they were ejected outside the crater after the solid-phase synthesis stage and a fairly rapid cooled.

Keywords: impact diamond, polycrystalline aggregate, spectroscopy, X-ray, Siberian platform, yakutites

REFERENCES

- Afanasyev V.P., Ugap'eva S.S., Yelissev A.P., Gromilov S.A. Yakutites as impact diamonds of The Popigai astrobleme. *Ores and metals*. **2019**. N 2. P. 30–37 (in Russian).
- Afanasyev V., Pokhilenko N., Eliseev A., Gromilov S., Ugap'eva S., Senyut V. Impact diamonds: types, properties and uses. In: *14th International Congress for Applied Mineralogy*. Belgorod, Russia, **2019**. P. 179–182.
- Bokiy G.B., Bezrukov G.N., Klyuev Yu.A., Naletov A.M., Nepsha V.I. Natural and synthetic diamonds. Moscow: Nauka, **1986**. 220 p. (in Russian).
- Galimov E.M., Ivanovskaya I.M., Klyuev Yu.A. et al. Isotopic composition and features of the crystal structure of natural polycrystalline diamonds with lonsdaleite. *Geochemistry*. **1980**. N 4. P. 533–539 (in Russian).
- Galimov E.M. Variations of the isotopic composition of diamonds and their relation to the conditions of diamond formation. *Geochemistry*. **1984**. N 8. P. 1091–1117 (in Russian).
- Isaenko S.I., Shumilova T.G. Thermally stimulated splitting of Raman active lonsdaleite modes. *Bull. Inst. Geol. Komi Sci. Center Ural Branch RAS*. **2011**. N 9. P. 29–33 (in Russian).
- Halperin A., Nahum J. Some optical and electrical properties of semiconducting diamonds. *J. Phys. Chem. Solids*. **1961**. Vol. 18. Issue 4. P. 297–300.
- Kaminsky F.V., Blinova G.K., Galimov E.M. et al. Polycrystalline diamond aggregates with lonsdaleite from placers of Yakutia. *Miner. J.* **1985**. Vol. 7. N 1. P. 62–67 (in Russian).
- Klyuev Yu.A., Nepsha V.I., Epishina N.I. et al. Features of the structure of natural polycrystalline diamonds. *Doklady Acad. Sci. SSSR*. **1978**. Vol. 240 (5). P. 1104–1107 (in Russian).
- Koptil V.I. Typomorphism of diamonds from the North-east Siberian platform in connection with the problem of forecasting and prospecting for diamond deposits. Ph. D. thesis syn. Novosibirsk, **1994**. 34 p. (in Russian).
- Orlov Yu.L., Kaminskiy F.V. Carbonado with lonsdaleite, a new (eleventh) variety of polycrystalline diamond aggregate. *Doklady Acad. Sci. SSSR*. **1981**. Vol. 259. P. 161–163 (in Russian).
- Salehpour M.R., Satpathy S. Comparison of electron bands of hexagonal and cubic diamond. *Phys. Review*. **1990**. B 41. P. 3048–3052.
- Ugap'eva S.S., Zayakina N.V., Pavlushin A.D., Oleinikov O.B. The results of compound mineralogical studies of yakutites from placer deposits in the Anabar diamondiferous region. *Native Geol.* **2010**. N 5. P. 37–44 (in Russian).
- Vishnevsky S.A., Afanasyev V.P., Argunov K.P., Palchik N.A. Impact diamonds: Features, origin and significance. Novosibirsk, **1997**. 53 p. (in Russian).
- Wen B., Zhao J., Bucknum M., Yao P., Li T. First-principle studies of diamond polytypes. *Diamond and Related Materials*. **2008**. N 17 P. 356–364.
- Yelissev A., Meng G.S., Afanasyev V., Pokhilenko N., Pustovarov V., Isakova A., Lin Z.S., Lin H.Q. Optical properties of impact diamonds from the Popigai astrobleme. *Diamond and Related Materials*. **2013**. N 37. P. 8–16.
- Yelissev A., Khrenov A., Afanasyev V., Pustovarov V., Gromilov S., Panchenko A., Pokhilenko N., Litasov K. Luminescence of natural carbon nanomaterial: Impact diamonds from the Popigai crater. *Diamond and Related Materials*. **2015**. 58. P. 69–77.
- Yelissev A.P., Afanasyev V.P., Gromilov S.A. Yakutites from the Popigai Meteorite Crater. *Diamond and Related Materials*. **2018**. Vol. 89. P. 10–17.
- Yelissev A., Gromilov S., Afanasyev V., Sildos I., Kiisk V. Effect of lonsdaleite on the optical properties of impact diamonds. *Diamond and Related Materials*. **2020**. Vol. 101. P. 107640.
- Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: a data handbook. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, **2001**. XVII. 502 p.
- Zinchuk N.N., Koptil V.I. Typomorphism of diamonds from the Siberian Platform Moscow: Nedra, **2003**. 603 p. (in Russian).